

侧抑制效应的光学模拟及其在图象处理中的应用

罗 懿 祖

(中国科学院物理研究所)

本文提出了一种生物视觉系统的侧抑制效应的光学模拟方法及其理论。即将一张正焦负片与一张散焦的模糊正片重叠在一起可得到轮廓加强的增强图象。本文从理论上证明了这一方法是在原图象上叠加了对此图象的空间微分,与描述侧抑制效应的微分数学模型相同。

一、概 论

侧抑制效应首先在鲎眼中被发现,以后又知道它存在于人眼及其它许多动物如猫、蛙等的视觉系统中。这引起了许多人的兴趣,并建立了多种数学模型进行描述。最简单的是马赫提出的二次微分模型。它只是近似的定性描述了侧抑制现象^[1]。然而在电子学及光学上模拟较为容易。在电视系统中采用二次微分式的“勾边电路”改善图象质量,为侧抑制效应的电学模拟。在光学中利用侧抑制效应可以处理图象,改善图象质量。1972年 H. B. Barlow 等人^[2]在“机器与动物的视觉图象分析”一文中提出生物视觉系统有减少输入信号的多余信息的功能,如侧抑制,对运动方向的选择灵敏性等。并且有许多技术模拟生物的这些功能并列了用模糊模片法描取图象轮廓特征而减去了其余的信息。这个方法是将正焦正片与模糊离焦负片相重合,得到了“轮廓图象”效应。这是一种视觉系统“马赫带”的简单模拟。并提出了计算机模拟法及各种图象处理技术。如从噪声中提取信息及图象的边缘检测等。这一方法是生物视觉系统侧抑制效应的一种光学模拟。

人眼的视觉生理特点之一就是视觉对光亮度变化的地方反应特别强。可以举下例说明,如图 1。

图 1(a) 表示进入人眼的光强度为一方波

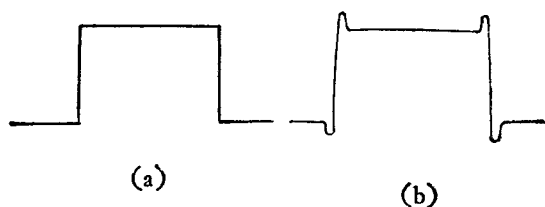


图 1 视觉的侧抑制效应

(a) 进入人眼的光强度 (b) 视觉反应强度

函数。图 1(b) 表示视觉反应。可以看到在边框地方反应灵敏。这种现象产生于视网膜感受野的性质^[3]。实验表明,视网膜感受野可分为:给光中心感受野(记为 on-RF);撤光中心感受野(记为 off-RF)及给光-撤光感受野(记为 on-off-RF)。对于 on-RF 及 off-RF 来说又分为三个反应区,这三个反应区呈同心圆形状。随着光线照射感受野的不同区域及不同强度分别显示出 on-反应,即给光时引起神经节细胞的神经发放增加。off-反应,即撤光时引起神经节细胞的神经发放增加。和 on-off 反应,即能产生 on 反应又能引起 off 反应。因此当照射眼睛的光强如图 1(a) 所示为一方波函数时,则在给光及撤光时分别在 on-RF 及 off-RF 产生较强的反应,如图 1(b)。这一现象已由组织学及电生理实验所证明,它是侧抑制神经网络所起的作用。本文也提出了一种侧抑制效应的光学模拟法,用以改善图象质量。

四十多年以前国外初步实现了使图象增强的照相方法^[4,5]。这一方法后来已广泛的应用在 X 射线照相、航空摄影、地图的绘制等方面。

这个方法是:用待处理的负片故意使它进一步模糊地翻拍一张正片。将这一对正、负片重叠在一起印相,则可以得到图象细节突出、轮廓增强的效果。根据这一原理接连又提出了许

多方法,如电子学的、照相术的等等^[6,7]。

在国际上对这一方法的理论解释都是建立在频率域中借助于传递函数进行讨论^[7-9]。

我们认为这个方法实际上是生物视觉侧抑制效应的一种光学模拟。这个方法与 H. B. Barlow 等人所提出的用正焦正片与离焦负片相重合,产生轮廓图象的方法是基于同一技术并且均属于侧抑制效应的光学模拟。在上述方法中为提取图象轮廓特征,用模糊负片从正焦正片中减去其余信息,而留下了清楚的轮廓正像,印相后得轮廓图象。我们所提出的模拟方法是增强图象。从正焦负片中减去模糊正片得到轮廓增强、细节突出的图象。这两种方法均是侧抑制效应的光学模拟。我们将从理论上证明图象增强技术是侧抑制效应的光学模拟,与描述侧抑制效应的微分数学模型相同。

二、理 论

本节将证明这个方法产生的图象与描述侧抑制效应的微分数学模型相同。我们是在空间域中从空间微分的角度来证明。由于信号的调制是小的,因此假设满足线性近似的要求。

A. 正负片的数学描述:

用胶片记录图象 $f(x, y)$ 。假定图象记录在所用胶片的 H 和 D 曲线的线性部分。则所得到的负片光密度 $D_N(x, y)$ 表述为:

$$D_N(x, y) = r_N \lg f(x, y) + D_0 \quad (1)$$

其中 r_N 为反差值。 D_0 为一常数,表示偏置光密度。此负片强度透过率为:

$$\tau_N(x, y) = \tau_0 [f(x, y)]^{-r_N} \quad (2)$$

其中 $\tau_0 = 10^{-D_0}$, 为一常数,表示偏置透过率。

利用这张待处理的负片制作一张模糊正片。经常用来产生模糊像的方法是半影和离焦。用胶片记录这个模糊像。仍假定图象记录在所用胶片的 H 和 D 曲线的线性部分。所得到的模糊正片光密度 $D_p(x, y)$ 为:

$$D_p(x, y) = -r_2 \lg g(x, y) + D_{Np0} \quad (3)$$

其中 $r_2 = r_N r_p$, r_p 为正片反差值。 $D_{Np0} = D_{p0} - r_p D_0$, 为常数密度项。 D_{p0} 表示正片的偏置光密度。

下面讨论模糊像 $g(x, y)$ 。在线性空间不变系统 $g(x, y)$ 用卷积来表示:

$$g(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x', y') h(x - x', y - y') dx' dy' \quad (4)$$

$h(x, y)$ 为模糊系统的点扩展函数。

以下为简单起见只讨论一维情况,原则上可将结果推广到二维。

$h(x)$ 不论在半影或大离焦的情况下均可用矩形函数来表述,见图 2。

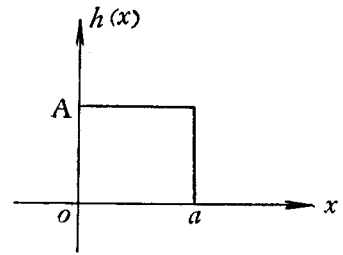


图 2 一维模糊系统的点扩展函数

$$h(x) = \text{rect}(x) = \begin{cases} A & 0 \leq x \leq a \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中 a 为 x 方向的模糊范围。 A 为幅度。

下面计算模糊像 $g(x)$ 。将 (5) 式代入 (4) 式内,作变数替换后,考虑到模糊范围 a 为小量,所以将 $f(x)$ 在空间坐标 x 处作泰勒级数展开,在取线性近似后得到模糊像表达式:

$$g(x) = B f(x) - \frac{B}{2} a \frac{df(x)}{dx} \quad (6)$$

其中 $B = Aa$, 为常数。将 (6) 式代入 (3) 式中,并将对数函数作级数展开,取线性近似后得到模糊正片光密度表达式:

$$D_p(x) = -r_p D_N(x) + \frac{r_p}{2} a \frac{dD_N(x)}{dx} + D_{p0} + K \quad (7)$$

其中 $K = -r_2 \lg B$, 为一常量。由 (7) 式可求出模糊正片透过率:

$$\tau_p(x) = \tau_{p0} \left[f(x) - \frac{a}{2} \frac{df(x)}{dx} \right]^{r_N r_p} \quad (8)$$

其中 τ_{p0} 为一常数透过率。

(7) 式及 (8) 式分别描写模糊正片的光密度及透过率。(7) 式右边的第一项及第三项是

描述负片正焦翻拍为正片时的光密度。第二项则是制取模糊正片所产生的效果。它是对负片光密度进行空间微分的项,而这项的符号正好与第一项的符号相反。这说明图象轮廓,细节进一步模糊了。显然从正片透过率表达式(8)中可以看到,[]括号内为从原图象上减掉了对此图象的空间微分,因而图象进一步模糊。(7)式右边第四项是常数项,它表明模糊模片偏置点的移动。

B 图象增强原理

将待处理的负片与用它制作的模糊正片重叠在一起,可以证明得到图象增强的效果。正负片重叠后产生的总光密度为负片光密度与正片光密度之和。总透过率为它们各自透过率之积。总光密度 $D(x)$ 表述为:

$$D(x) = bD_N(x) + \frac{a}{2} r_p \frac{dD_N(x)}{dx} + D_{p0} + K \quad (9)$$

其中 $b = 1 - r_{p0}$ 。公式中的第一项与第三项是当负片与用它翻拍的没有模糊的正片重叠所得到的总光密度。第二项与第四项表示由于翻拍模糊正片在总光密度中产生的效果。

在计算总透过率时,将(2)式与(8)式相乘。在忽略了高级小量之后可以得到总透过率表达式:

$$\tau(x) = \tau_{Np0} \left[f(x) + \frac{a}{2b} r_p \frac{df(x)}{dx} \right]^{-br_N} \quad (10)$$

其中 τ_{Np0} 为一常数透过率。(9)式与(10)式分别描写正负片重叠后产生的总光密度与总透过率。以下分为三种情况讨论:

1. 当正片反差值 r_p 小于1时,则 $0 < b < 1$ 。总光密度 $D(x)$ 中包含原图象负片光密度,但其幅度有个衰减,衰减因子为 b 。公式第二项是对原图象负片光密度的空间微分。注意到它的符号与第一项的符号相同,说明负片轮廓、细节增强。同样从总透过率(10)式明显地看到:公式表明为一负片,但其反差值降低为 br_N 。[]括号内是在图象 $f(x)$ 上叠加了对此图象的空间微分。所以印相后得到轮廓加强、细节突出的图象。其效果与视觉系统的侧抑制效

应相同,而(9)、(10)式与描述侧抑制效应的微分数学模型相同^[1]。这就是图象增强原理。也是提出这个方法为侧抑制效应的光学模拟的原理。

2. 当反差值 r_p 为1时,则 $b = 0$ 。(9)式与(10)式分别变为:

$$D(x) = \frac{a}{2} \frac{dD_N(x)}{dx} + D_{p0} + K \quad (11)$$

$$\tau(x) = \tau_{Np0} \left[1 + \frac{a}{2f(x)} \frac{df(x)}{dx} \right]^{-r_N} \quad (12)$$

它们分别描述 $r_p = 1$ 时的总光密度与总透过率。若图象 $f(x)$ 为缓变函数,则(12)式分母上1的 $f(x)$ 可用平均值 $\bar{f}$ 来代替。这两式表明,此时得到的是原图象的轮廓像。当 r_p 越接近于1时在画面上图象轮廓居主要地位越明显。

3. 当反差值 r_p 大于1时,则 $b < 0$ 。总光密度(9)式与总透过率(10)式分别与模糊正片的光密度(7)式与透过率(8)式相同。只是指数系数及括号中微分项的系数有些不同。所以仍产生模糊图象。同时反差与原图象相反。

三、结 论

文中提出了生物视觉系统侧抑制效应的一种光学模拟方法。

将待处理的负片在洗相反差值 r_p 小于1的显影条件下制作一张模糊正片。将这样一对正负片重叠在一起所产生的图象是在原图象上叠加了对此图象的空间微分。从而使图象轮廓加强,细节在画面上突出出来,与侧抑制神经网络所起的作用一样。和马赫在一百多年前所提出的描述侧抑制效应的微分模型相同,因此将这个办法提出为视觉系统的侧抑制效应的一种光学模拟法。因为人和其它许多动物视觉的生理特点使这种方法能产生图象质量改善的效果。

事实上一张图象在视网膜感受野中产生的是 on-反应机制,而模糊正片的像在视网膜感受野中产生的是 off-反应机制。综合的结果在视网膜上产生轮廓增强、清晰度提高的图象。实

(下转第26页)

何被络合,水解的?其水解产物——ADP 是否立即被释放?如何被释放?

4.在固氮酶催化过程中,ATP 究竟起哪些作用?ATP 水解所释放的自由能是否用来进一步提高铁蛋白的还原电位?是否用来提高钼铁蛋白底物络合还原中心的还原电位?

5.在固氮酶复合物中,从电子供体($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$)到被底物络合还原中心络合的 N_2 之间,是否存在着一条或多条电子转移通路?此通路是否主要是由铁蛋白的 Fe_4S_4 原子簇和钼铁蛋白的 Fe_4S_4 原子簇和铁钼辅因子所构成的?

6.在固氮酶中所发生的一连串的反应步骤中,限速步骤是那一步?是否就是固氮酶复合物的解离?

7.ATP 水解与放 H_2 、 N_2 还原三种反应在固氮酶中存在着那些关系?

8.在各种物理,化学因素的作用下,固氮酶的结构与活性有那些相应的变化规律?

9.钼铁蛋白的一级结构以及钼铁蛋白和铁蛋白的空间结构如何?

我们相信,上述问题的进一步研究,必将有助于进一步阐明固氮酶催化机理。

参 考 文 献

- [1] Thorneley, R. N. F., et al.: *Biochem. J.*, **165**, 255, 1977.
- [2] Kurtz, D. M. et al.: *Proc Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **76**, 4986, 1979.

- [3] Zimmermann, R., et al.: *Biochim. Biophys. Acta*, **537**, 185, 1978.
- [4] 吉林大学化学系固氮组,《吉林大学学报》,1978年,第4期,73页。
- [5] Rawlings, J. et al.: *J. Biol. Chem.*, **253**, 1001, 1978.
- [6] Mortenson, L. E., et al.: *Ann. Rev. Biochem.*, **48**, 387, 1979.
- [7] Stiefel, E. I., *Recent Development in Nitrogen Fixation* (Newton, W. E., et al.: ed.) pp. 69, Academic Press, London 1977.
- [8] Мицкова, И. З., и т. д., Докл. АН СССР, **251**, 494, 1980.
- [9] 尤崇杓等,《植物生理学报》1978年,第4期,123页。
- [10] Watt, G. D., et al., *Biochemistry*, **16**, 264, 1977.
- [11] Orme-Johnson, W. H., et al., *Recent Development in Nitrogen Fixation* (Postgate, J. R. et al. ed.) pp 131, Academic Press, London, 1977.
- [12] Mortenson, L. E. et al.: *Biochim. Biophys. Acta*, **292**, 422, 1973.
- [13] Hageman, R. V., et al.: *Biochemistry*, **17**, 4117, 1978.
- [14] Zumft, W. G. et al., *Eur. J. Biochem.*, **46**, 525, 1974.
- [15] Thorneley, R. N. F.: *Biochem. J.*, **145**, 391, 1975.
- [16] Hageman, R. V. et al.: *Biochemistry*, **19**, 2333, 1980.
- [17] Hageman, R. V., et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **75**, 2699, 1978.
- [18] Walker, G. A., et al.: *Biochemistry*, **13**, 2382, 1974.
- [19] Huynh, B. H., et al.: *Biochim. Biophys. Acta*, **527**, 192, 1979.
- [20] Emerich, D. W., et al.: *Biochim. Biophys. Acta*, **527**, 359, 1978.

[本文于1980年12月10日收到]

(上接第43页)

验证了这个结论。

感谢张洪钧同志与郑丛英同志对这一工作的关心和支
持。

参 考 文 献

- [1] 汪云九:《生物化学与生物物理进展》1975年,第4期,第60页。
- [2] Barlow, H. B. et al.: *Science*, **177**(4049), 567, 1972.
- [3] 汪云九:《生物化学与生物物理学报》,1979年,第10卷,第1期,第1页。

- [4] Spiegler, G. et al.: *Photo. Korr.*, **67**, 4, 1931. *ibid*, **69**, 36, 1933.
- [5] Yule, J. A. C.: *Photo. Jour.*, **84B**, 321, 1944.
- [6] Schreiber, W. F.: *Pattern Recognition*, **2**(2), 117, 1970.
- [7] Levit, L.: *Computer Graphics and Image Processing*, **3**, 163, 1974.
- [8] Levit, L.: *Applications of Holography and Optical Data Processing*, **73**, 1977 Pergamon Press.
- [9] Armitage, J. D. et al.: *Appl. Opt.*, **4**(4), 445, 1965.

[本文于1980年12月27日收到]